

Un nouveau paradigme pour les chambres réverbérantes : la TREC

Andrea Cozza

Professeur Adjoint

SUPELEC

Département de Recherche en Electromagnétisme

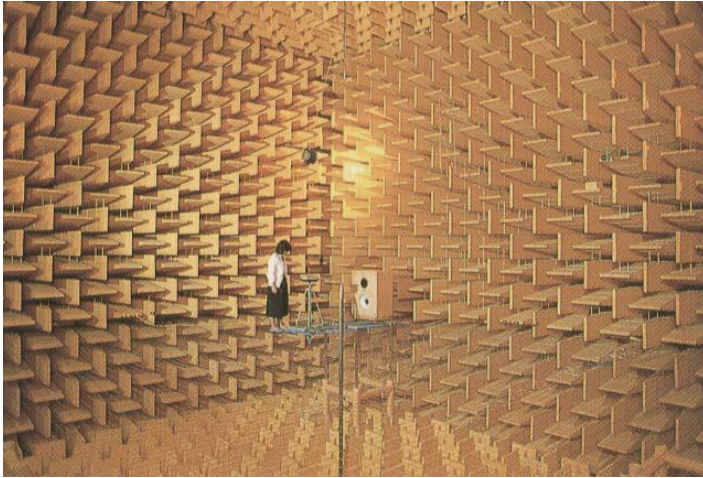
3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif sur Yvette

andrea.cozza@supelec.fr

Plan de l'exposé

- Limitations des moyens d'essai actuels
- Retournement temporel appliqué à une cavité : ses avantages ...
- ... et ses limitations
- La TREC : un nouveau paradigme du RT et des grandes cavités
- Conclusions et perspectives

Moyens d'essai pour tests rayonnés



Chambre anéchoïque

- ✓ Émulation de l'espace libre
- ✓ Contrôle simple de l'illumination (espace-temps)
- ✗ Faible rendement énergétique
- ✗ Grand nombre de configurations de test (directions d'incidence)



Chambre réverbérante

- ✓ Génération d'un ensemble aléatoire d'illuminations (caractérisation globale)
- ✓ Fort rendement énergétique
- ✗ Aucun contrôle spatial
- ✗ Tests pulsés difficiles
- ✗ Aucun feedback sur la cause de NOK

Le retournement temporel

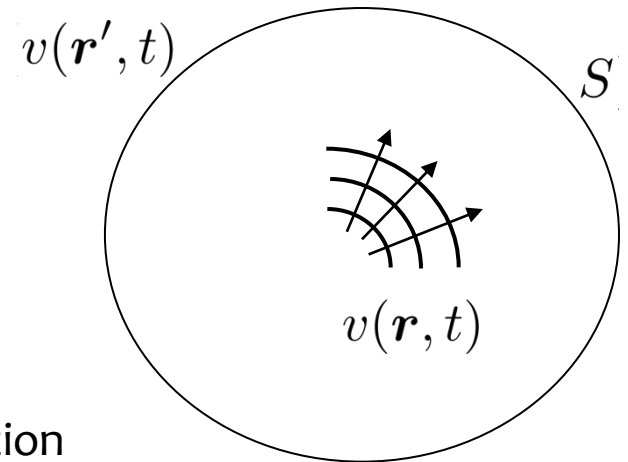
Le principe de Huygens (dûment formalisé!) permet d'introduire l'équivalence entre de sources secondaires déportées et un front d'onde

$$v(\mathbf{r}, t) = \mathcal{H}\{v(\mathbf{r}', t) , \mathbf{r}' \in S\}$$

Pour un milieu réciproque, l'invariance RT de l'équation d'onde implique une symétrie entre front d'onde divergent et convergent

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) v(\mathbf{r}, t) = 0$$

L'union de ces deux propriétés permet de reproduire une version convergente d'un front d'onde même dans un milieu aberrant

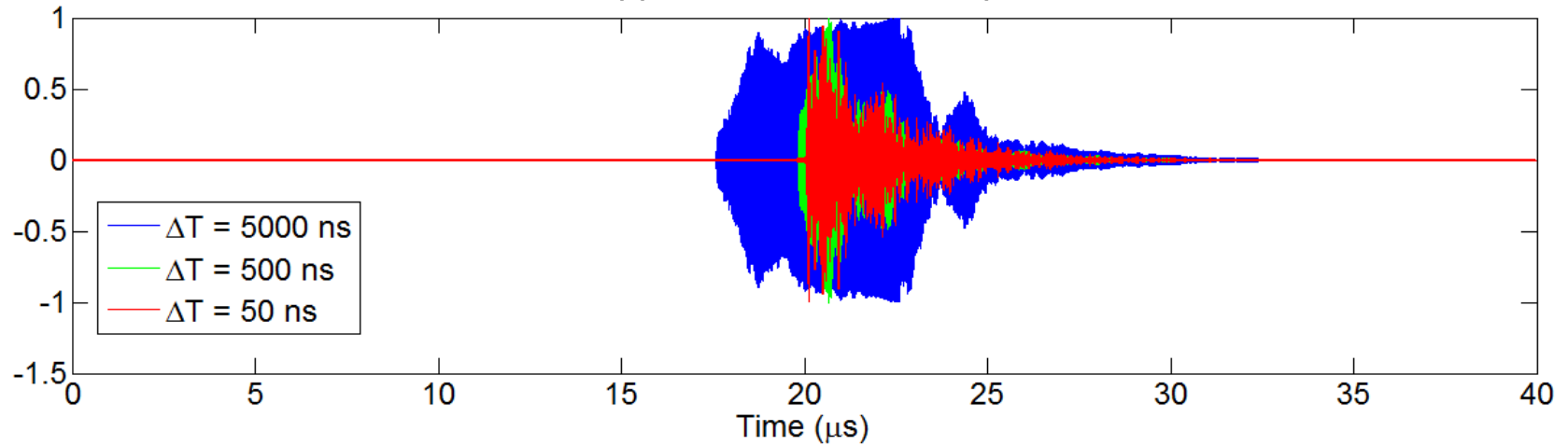


Application à une cavité

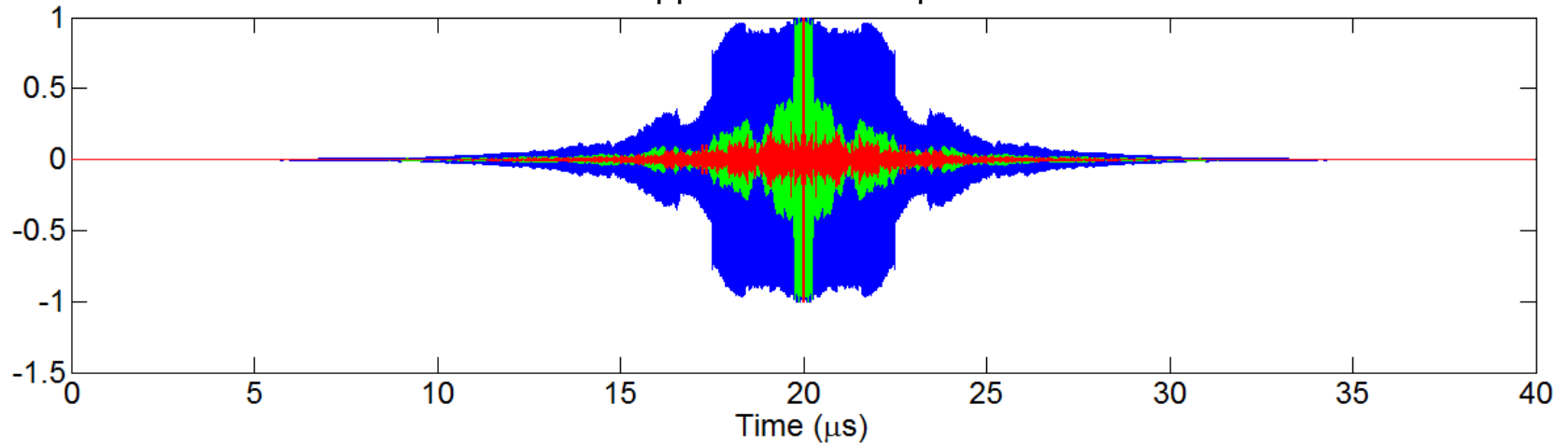
- Approche valable aussi en cavité (conditions aux limites réfléchissantes)
- Intérêts pratiques :
 - Génération de champ **impulsionnels**
 - Contrôle de la **polarisation** du champ par **synthèse** de signaux
 - Augmentation du **rendement** de conversion énergie – puissance instantanée

Transmission d'impulsions en CR

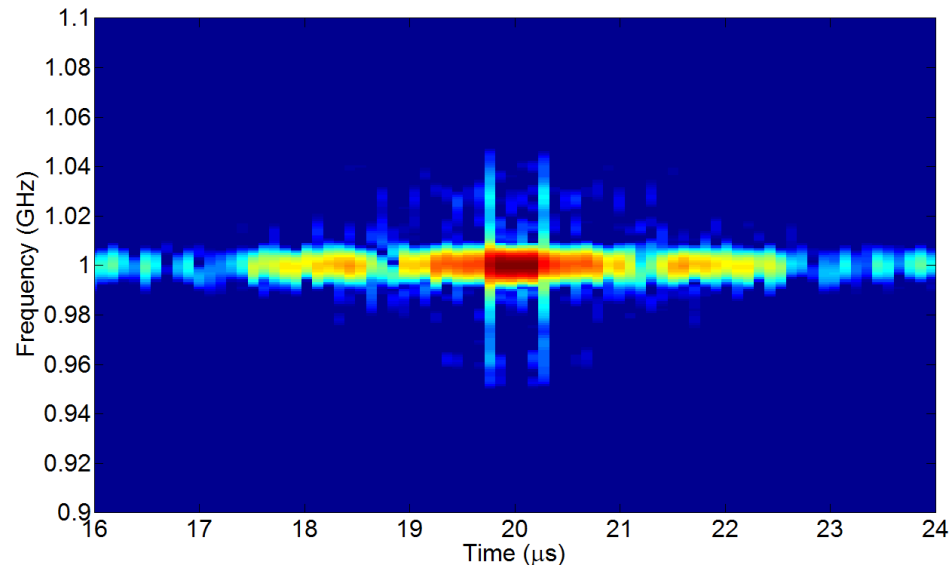
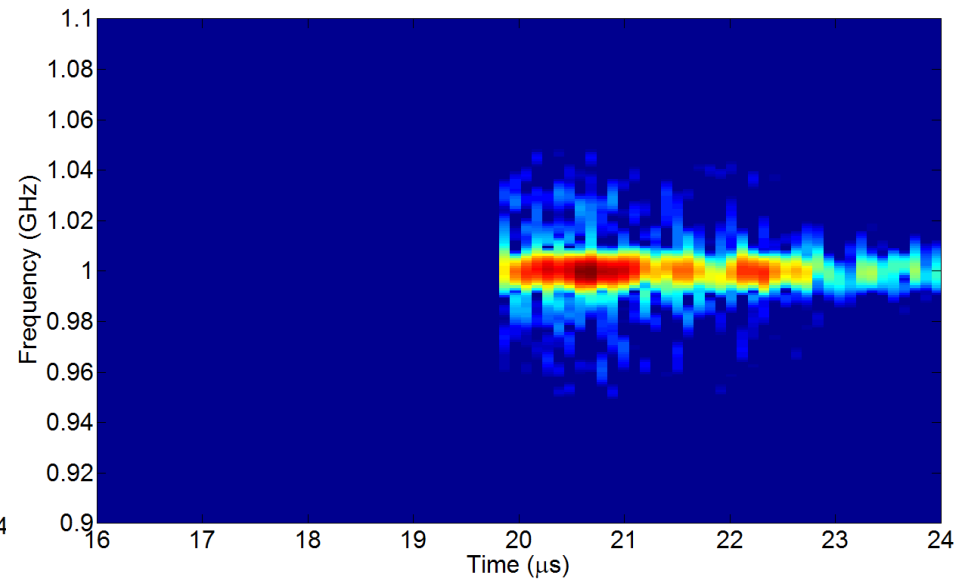
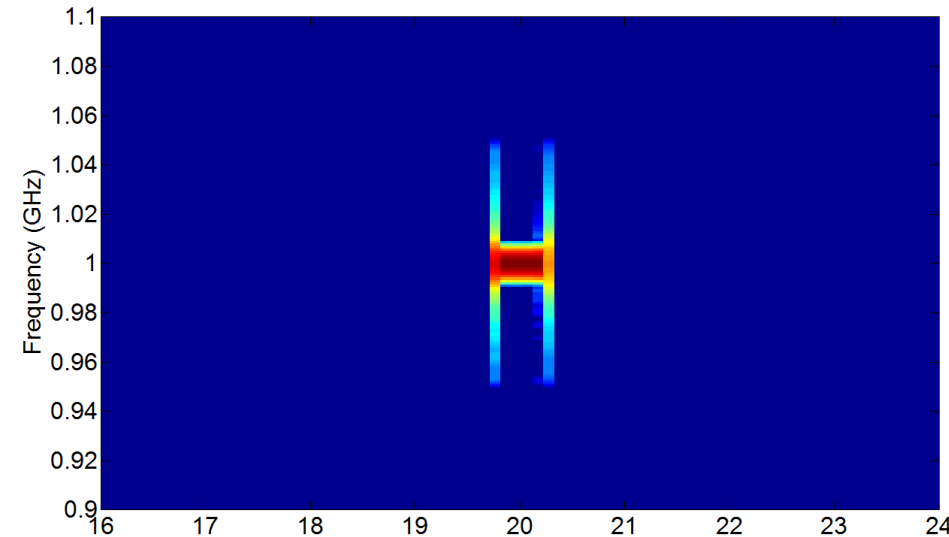
Application directe de l'impulsion



Approche filtre adapté



Transmission d'impulsions en CR



L'**application directe** de l'impulsion excite un grand nombre de modes résonants, mais de façon **non-cohérente**.

L'approche **filtre adapté** vise à exciter ces modes de façon « **synchrone** », pour mieux approcher l'impulsion d'origine.

Pour ce faire, les modes ne sont pas excités au même instant, mais de façon **différée**, avec une **avance** dans le temps.

Rendement d'énergie

Rendement de conversion

$$\eta = \left\langle \frac{|E_{peak}|^2}{E_{in}} \right\rangle$$

Le **rendement énergétique** est donc **plus important** qu'avec une CR standard, grâce à la focalisation

$$\frac{\eta_{TR}}{\eta_{RC}} \approx \frac{QB_T}{\pi f_0}$$

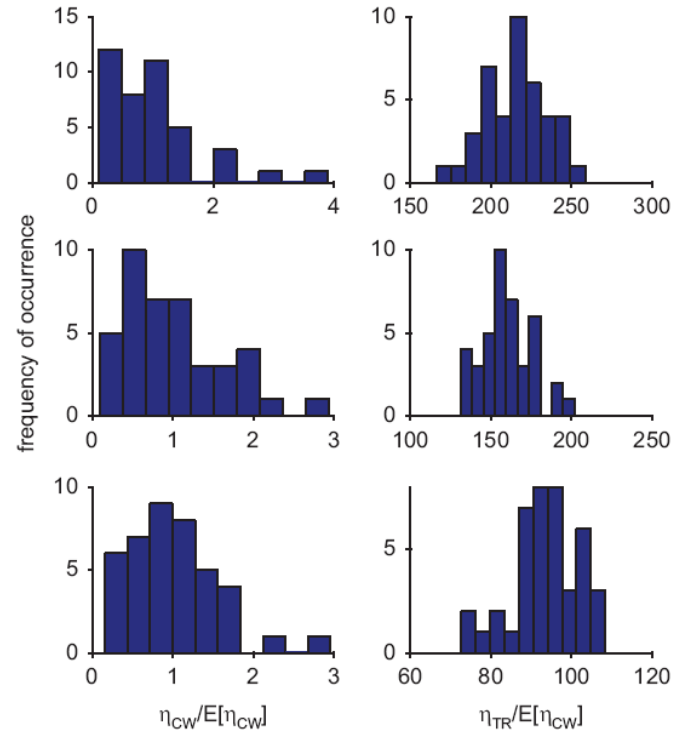
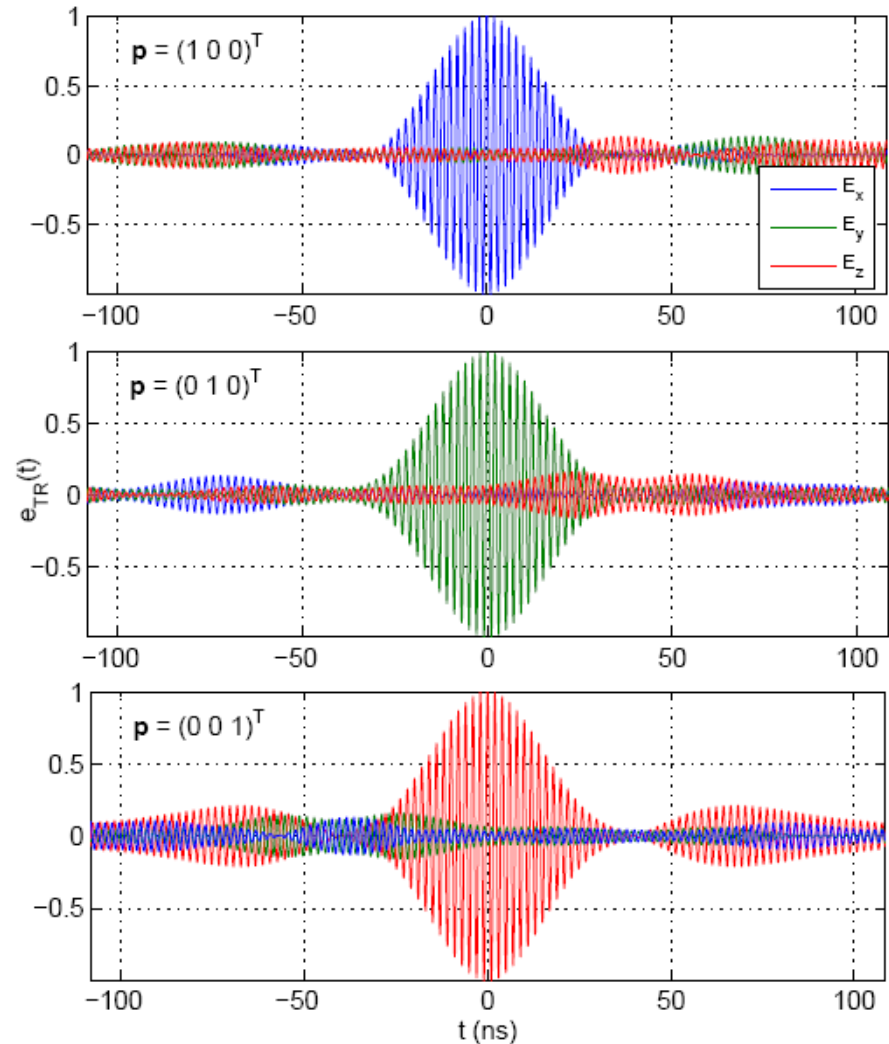


Fig. 1 Frequencies of occurrence distributions of η_{CW} (left column) and η_{TR} (right column), as obtained from transfer functions measured over bandwidth $B_T = 100$ MHz, at central frequency $f_c = \{1.0, 1.5, 2.0\}$ GHz (top to bottom, respectively)

All results normalised to average values of η_{CW} .

Contrôle de la polarisation

- La polarisation peut être contrôlée via les signaux d'excitation
- Cross-polarisation < -20 dB
- Aucun besoin de déplacement mécanique, ni de source spécifiques
- Possible grâce à l'orthogonalité des fonctions de transfert dans un milieu diffusif (ondes non-cohérentes)



Retournement temporel dans une cavité

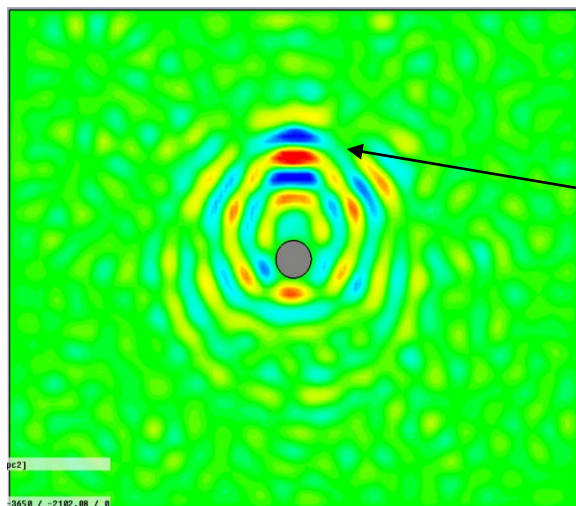
- Transmission de formes d'ondes pulsées dans un milieu typiquement difficile
- Concentration de l'énergie dans un volume réduit

Maximisation de la **puissance instantanée** (temps), mais faible énergie injectée

Émulation de sources impulsionnelles (radar)

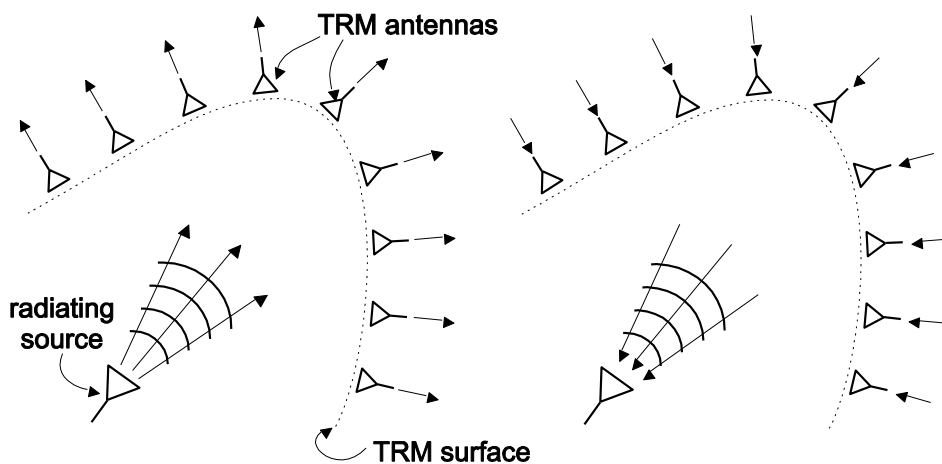
Maximisation de la **densité de puissance** (espace)

Tendance opposée à celles des CR en CW



L'énergie EM est maintenant concentrée dans l'espace et le temps, donc **maximisant l'efficacité de l'agression**

Approches standards pour le retournement temporel

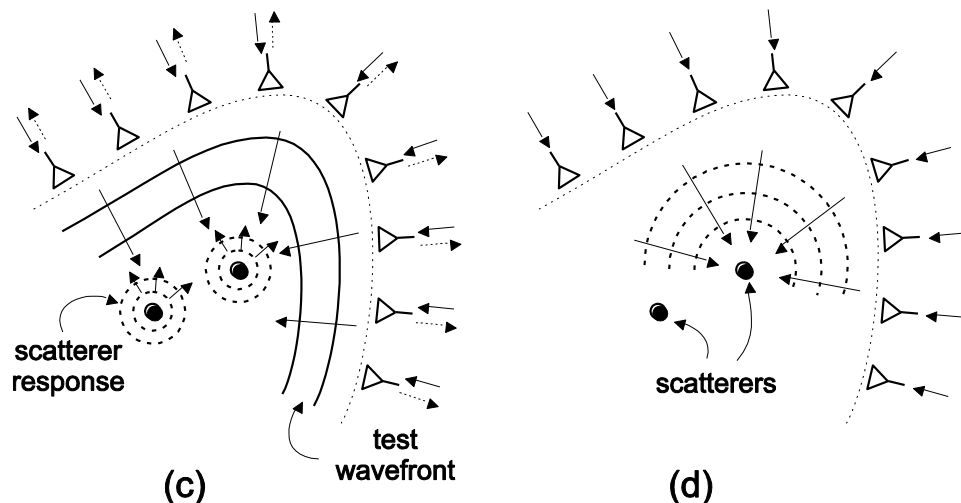


(a)

(b)

Approche « classique » : reproduction convergente (b) d'un front d'onde initialement divergeant (a).

Problème : besoin de sources et de leur déplacement



(c)

(d)

Approche DORT : focalisation vers un diffuseur passif ponctuel (d) à la suite d'une phase exploratoire (c).

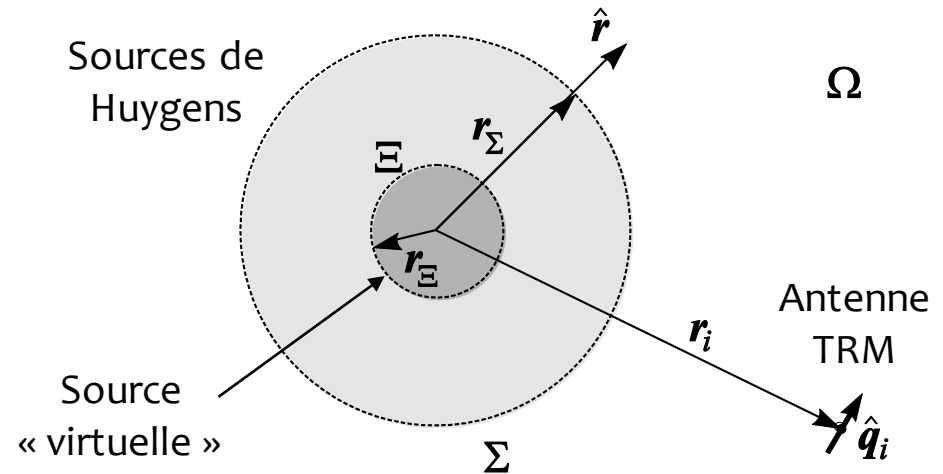
Problème : limitée à des diffuseurs ponctuels, aucun contrôle du front d'onde (reproduction du champ diffracté)

Peut-on utiliser le RT en pratique ?

- Pour un moyen d'essai il faut
 - Pouvoir contrôler le type d'illumination
 - Que l'onde de test soit répétable et indépendante de l'EST
- Avec le RT il serait nécessaire de
 - Répéter les phases d'apprentissage pour chaque illumination (temps)
 - Disposer de sources spécifiques correspondant à l'illumination voulues (coûts)
- En pratique, l'application aux tests serait **encore plus lente** qu'avec les moyens d'essai actuels !
- Seul avantage : champs forts

La TREC : une approche généralisée du RT

1. Description d'une source virtuelle par son rayonnement
2. Définition des courants de Huygens correspondant
3. Calcul des tensions reçues sur les antennes TRM
4. Excitation des antennes avec leurs versions retournées dans le temps

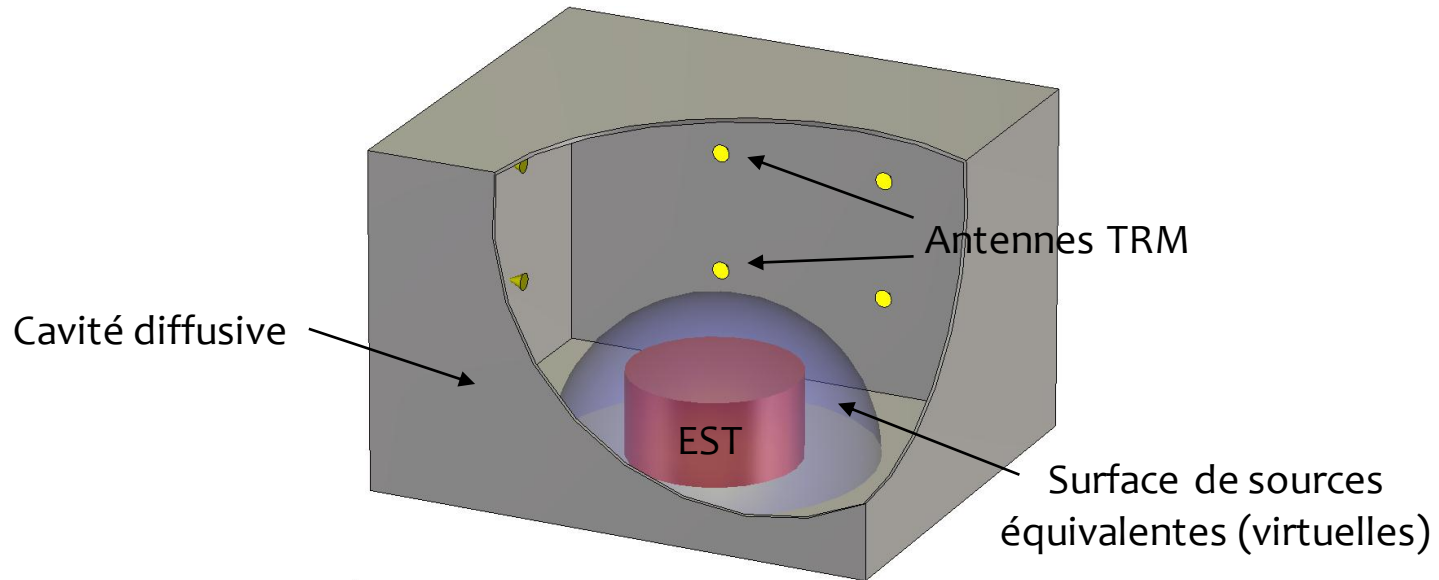


Seule donnée nécessaire : fonctions de Green entre **les positions** des sources de Huygens et les antennes TRM.

Maintenant la phase divergente est intégralement synthétique !

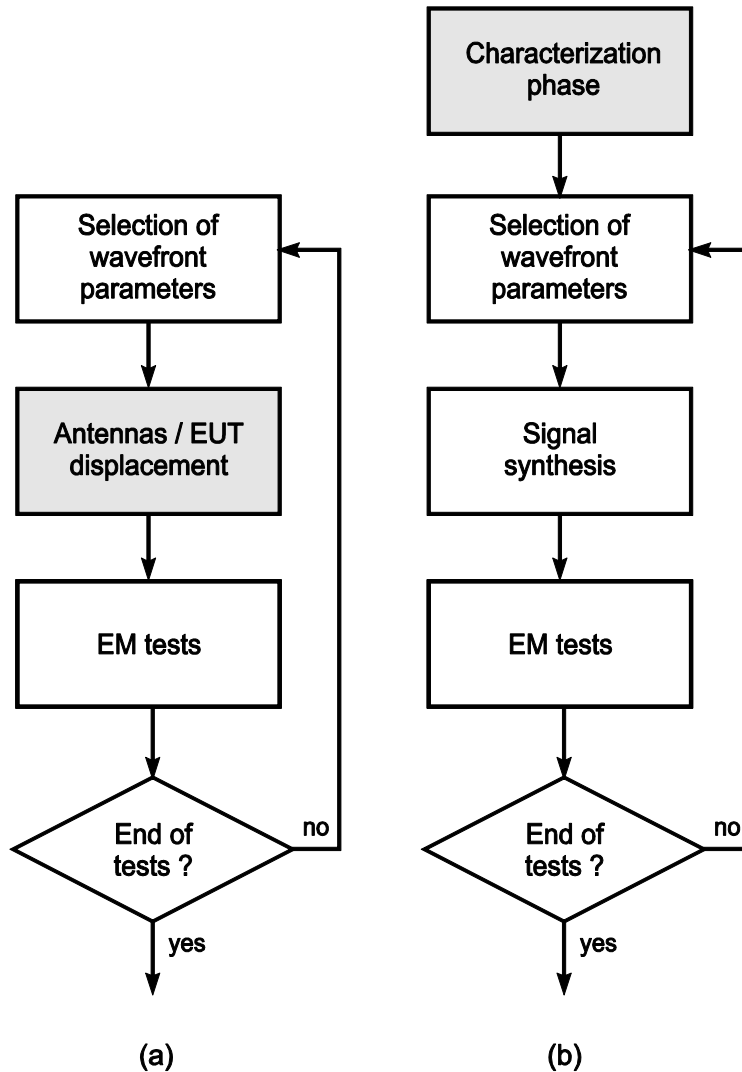
$$V_i(\omega) \propto \int_{\Sigma} \mathbf{N}_{\text{eq},i}(\mathbf{r}, \omega) \cdot \mathbf{E}_{\text{wf}}(\mathbf{r}, \omega) d^2\mathbf{r}$$

La TREC : une approche généralisée du RT



1. Phase initiale d'apprentissage du milieu donnant accès aux fonctions de Green -> **sondes mobiles**
2. Synthèse directe des signaux d'excitation pour un front d'onde arbitraire $\mathbf{E}_{wf}(\mathbf{r}, \omega)$

La TREC dans la pratique des tests rayonnés

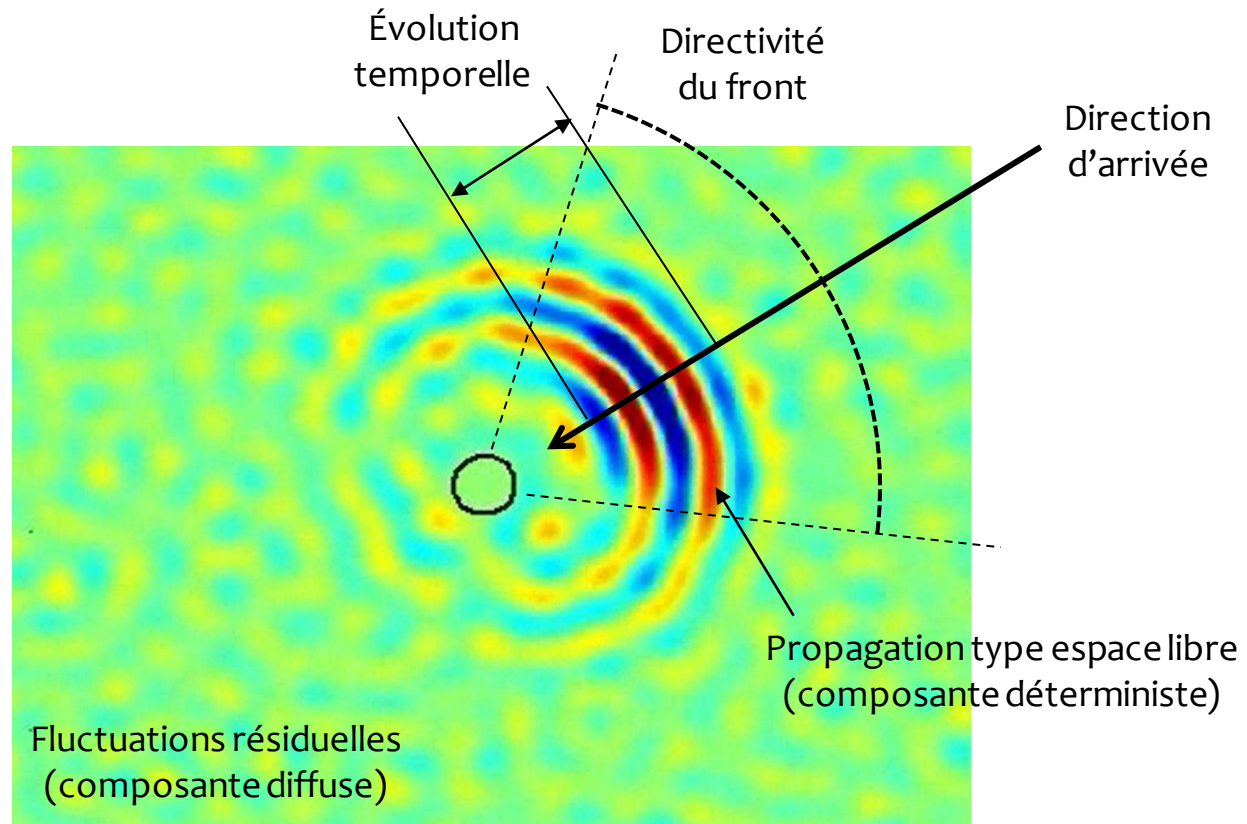


Passage d'un cadre d'itération mécanique (a) à une approche en deux parties (b) :

1. Apprentissage du milieu (mécanique rapide)

2. Génération de scénarii par émulation (synthèse de signaux)

Contrôle de l'évolution spatiale



L'isotropie des moments des fonctions de Green en milieu diffusif est le secret pour générer des fronts d'onde selon toute direction.

Déterminisme à partir d'un milieu aléatoire

La partie déterministe s'explique par l'ergodicité existante entre les réalisations modales (ensemble) et celles en fréquence sur B_T

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}(\mathbf{r}, 0) &= \int_{B_T} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \mathbf{H}^\dagger(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{p} \, d\omega \\
 \text{Bandes de cohérence} \longrightarrow &\simeq \sum_{n=1}^{B_T/B_c} \left(\int_{B_c} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \mathbf{H}^\dagger(\mathbf{r}_0) \, d\omega \right) \cdot \mathbf{p} \\
 &\xrightarrow{B_T/B_c \gg 1} B_T \tilde{\mathbf{W}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{p} \longleftarrow \text{Matrice de cohérence spectrale du milieu}
 \end{aligned}$$

L'intensité des fluctuations résiduelles se réduit donc comme prévu par le CLT

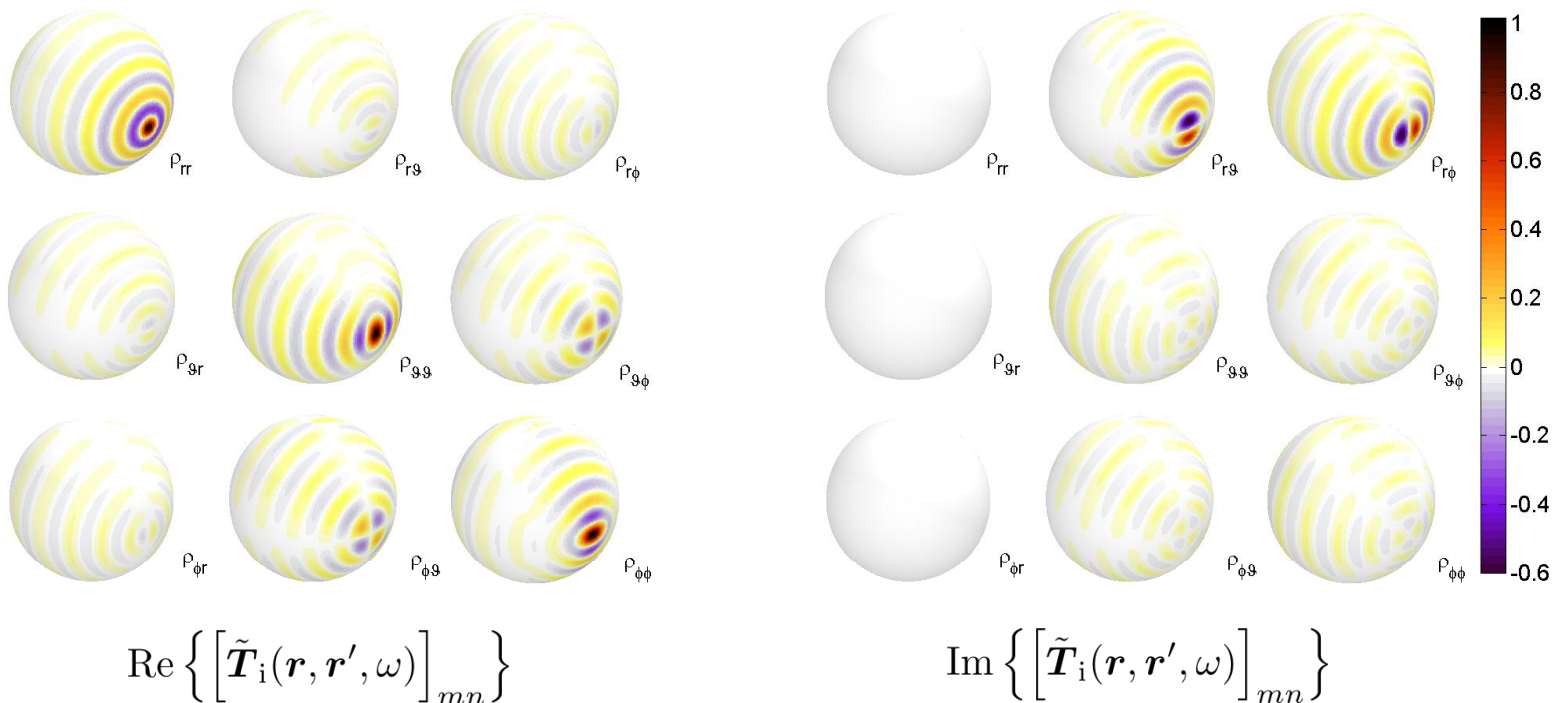
$$\sigma_{\Delta e} \sim \frac{1}{\sqrt{B_T/B_c}}$$

Point-spread function d'une TREC

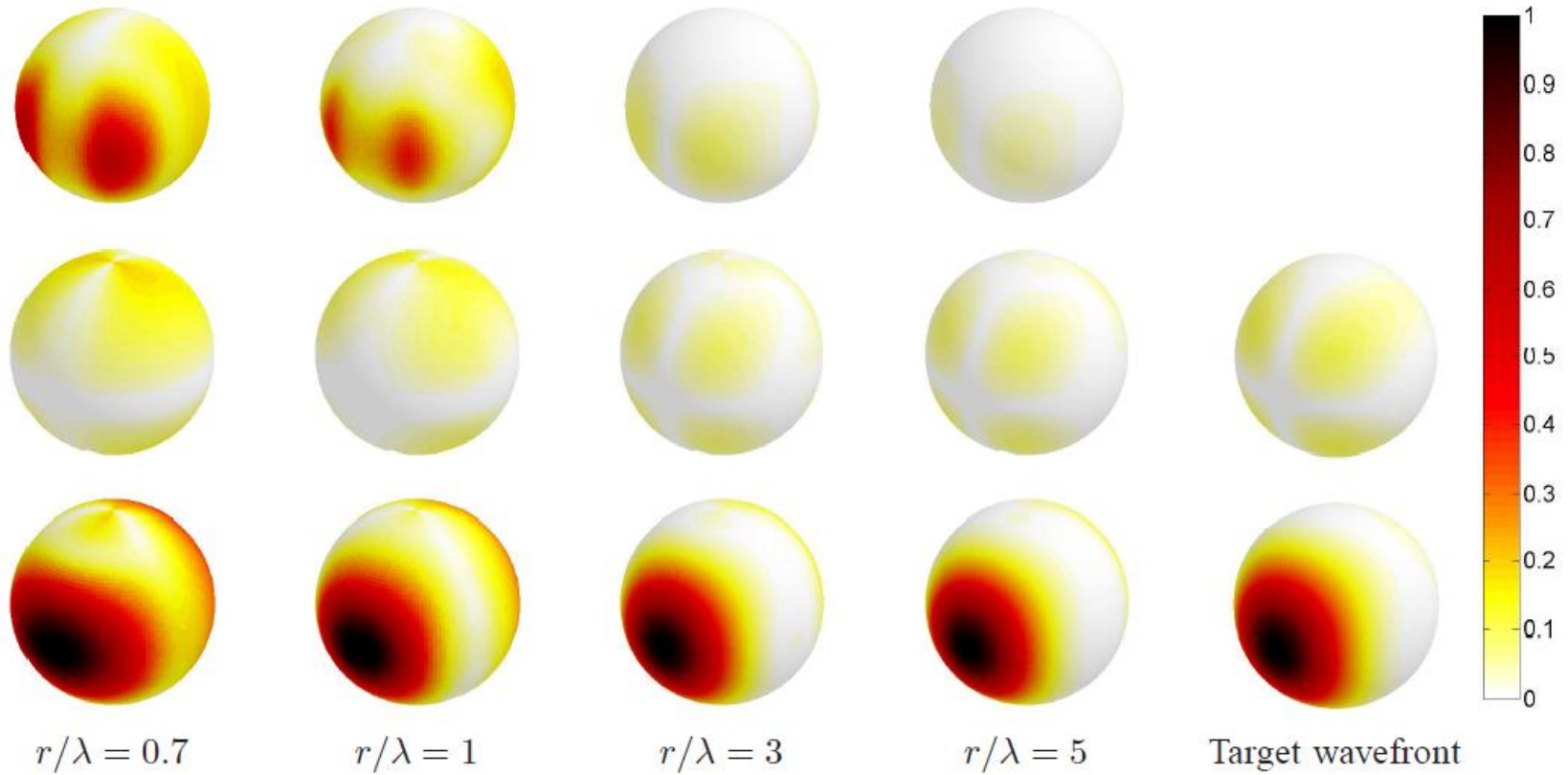
La partie déterministe s'écrit comme :

$$\langle \mathbf{E}_{\text{TR},i}(\mathbf{r}, \omega) \rangle = \int_{\Sigma} \tilde{\mathbf{T}}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \cdot \bar{\mathbf{E}}_{\text{wf}}(\mathbf{r}', \omega) d^2\mathbf{r}'$$

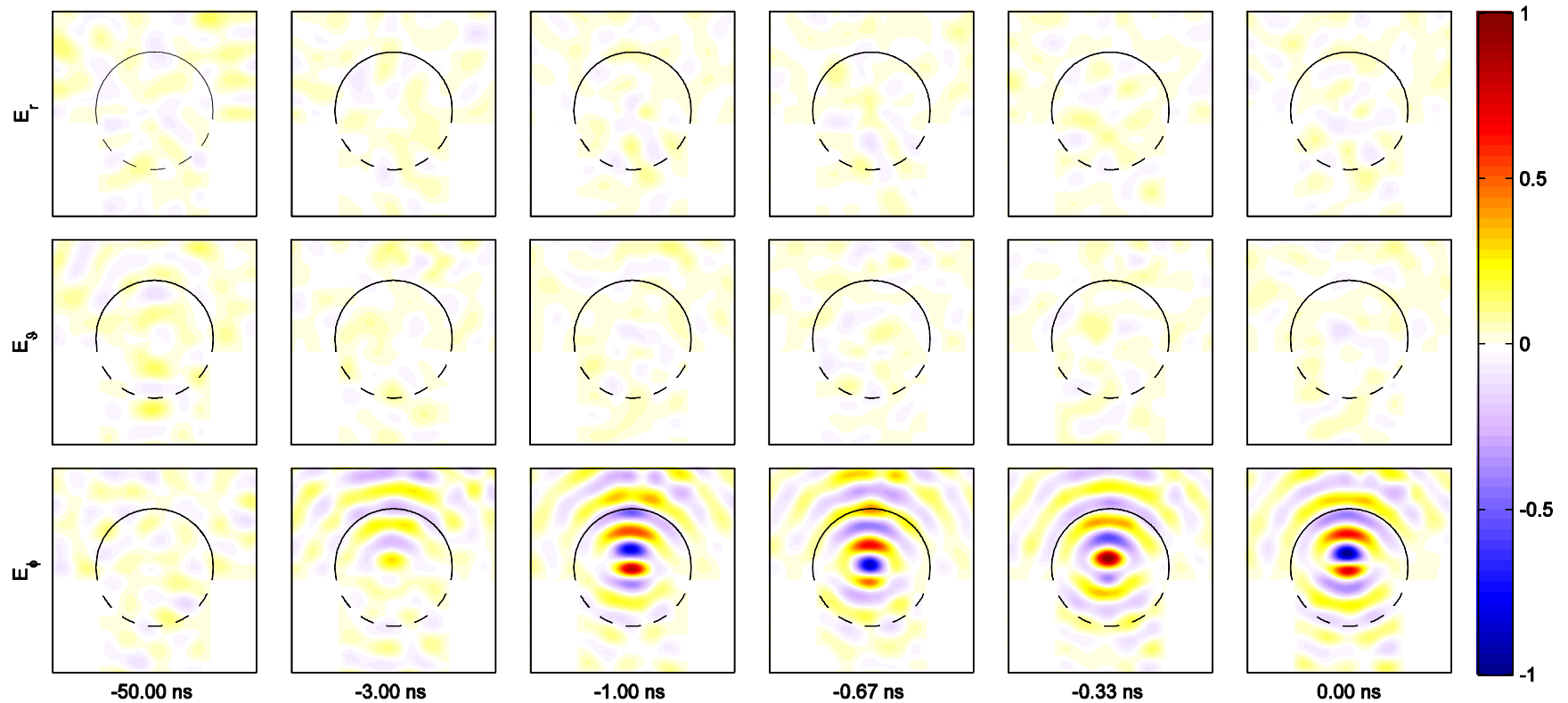
où l'opérateur dyadique a les composantes suivantes



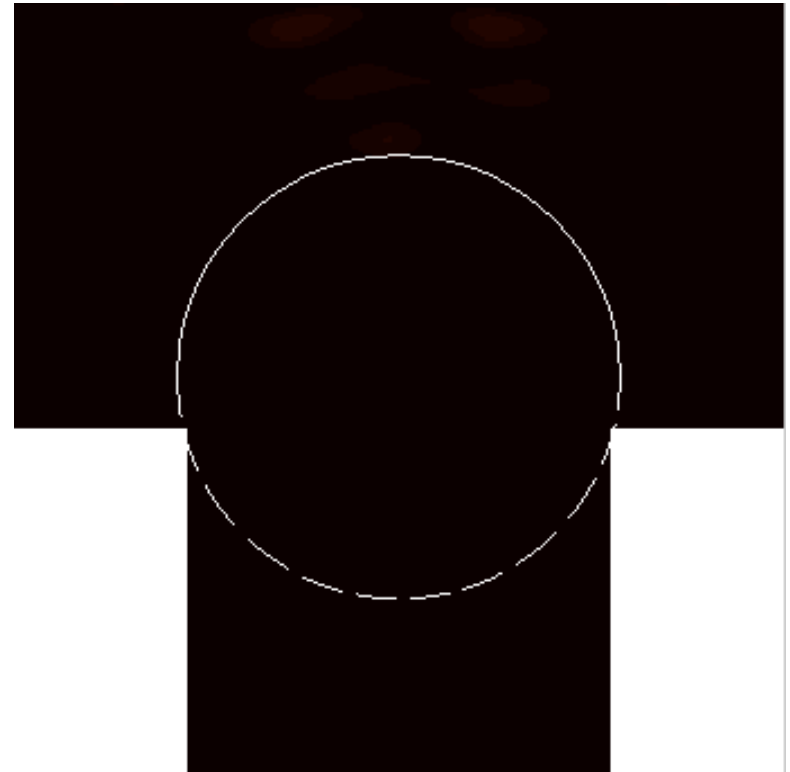
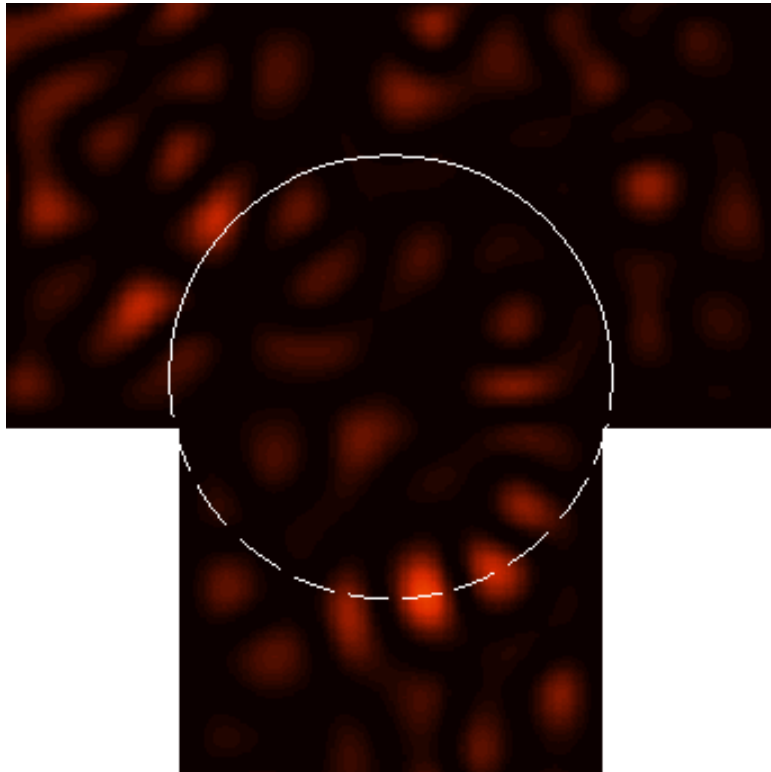
Reproduction d'un front d'onde directif



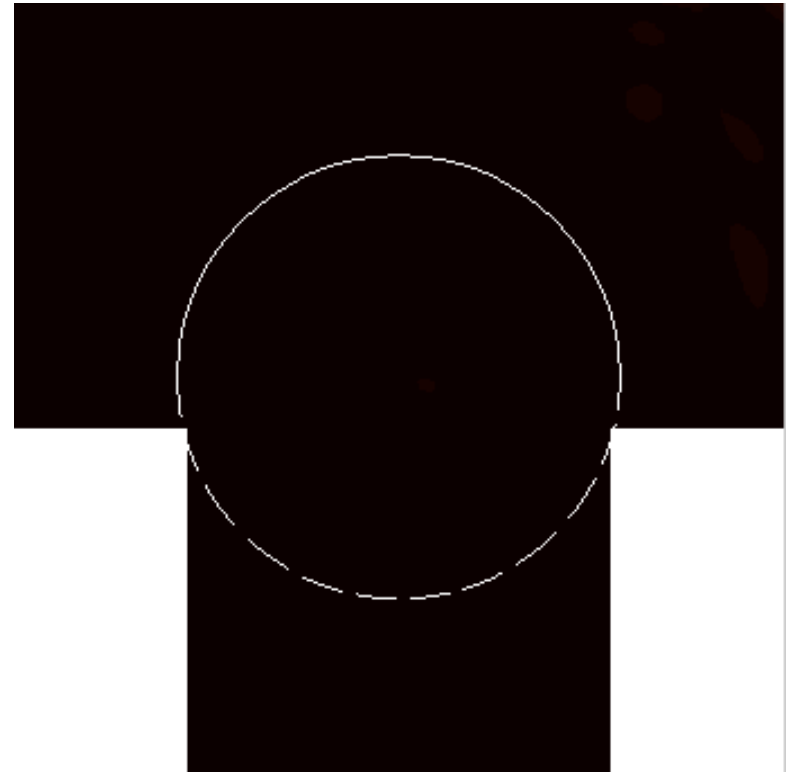
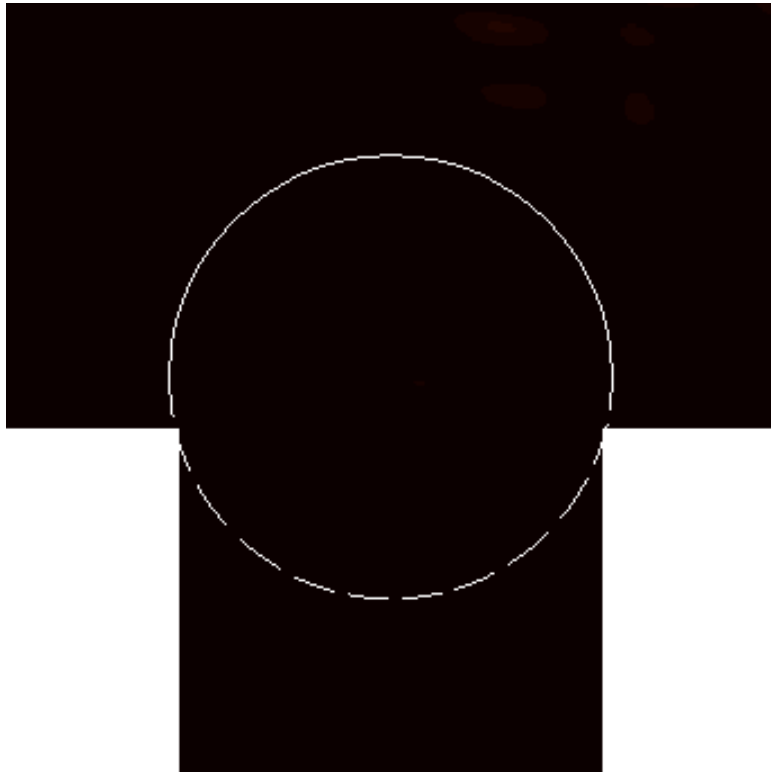
Quelques résultats expérimentaux



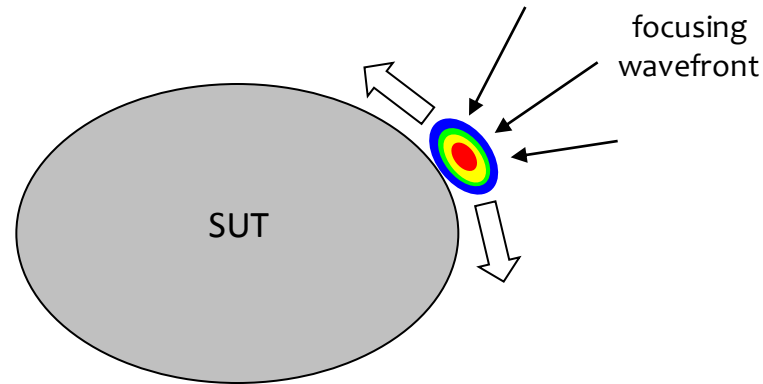
Quelques résultats expérimentaux



Quelques résultats expérimentaux

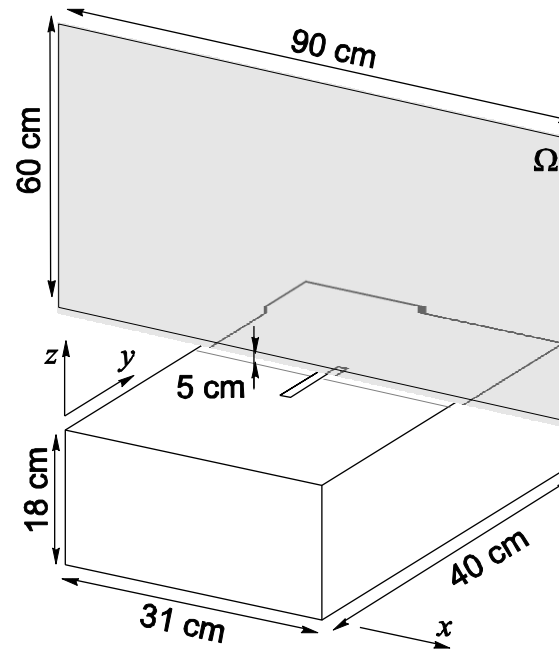


Vers une imagerie EMC



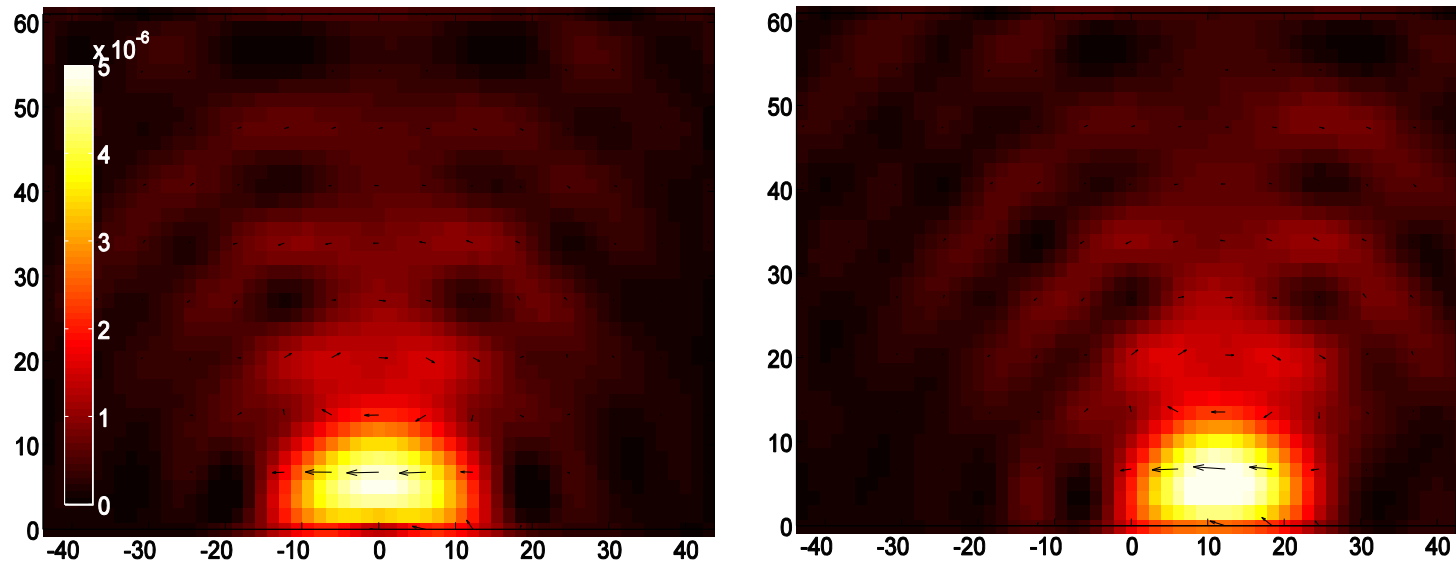
- Excitation d'une zone limitée par focalisation en surface
- Analyse polarimétrique pour l'identification des voies de couplage
- Macromodélisation de la réponse de l'EST
- Possibilité de prédiction pour d'autres scénarii

Vers une imagerie EMC



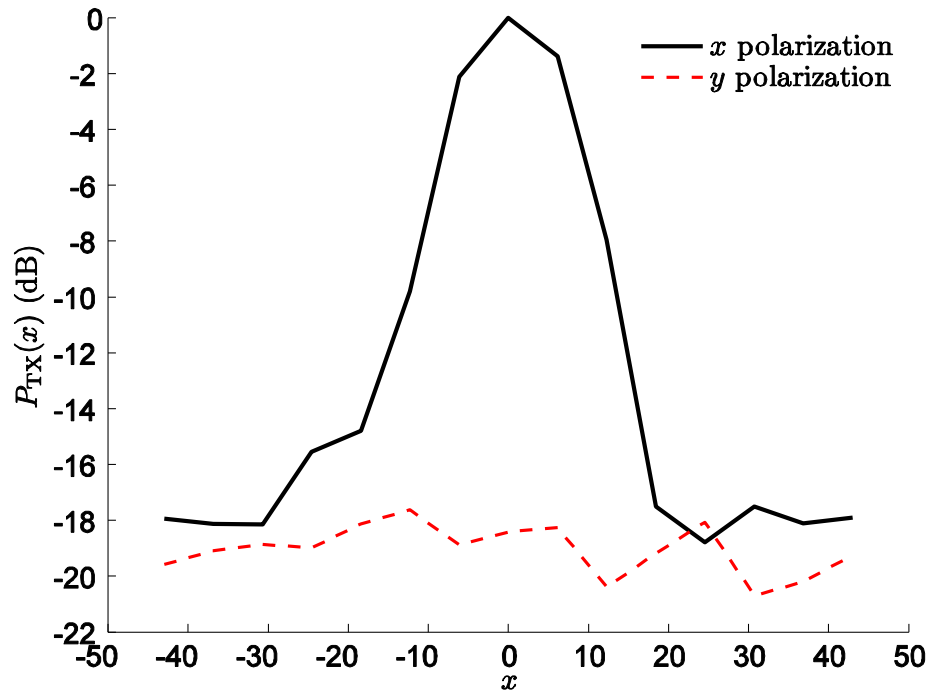
Dans ce cas, la voie de couplage est sensible à la polarisation de l'onde incidente

Vers une imagerie EMC



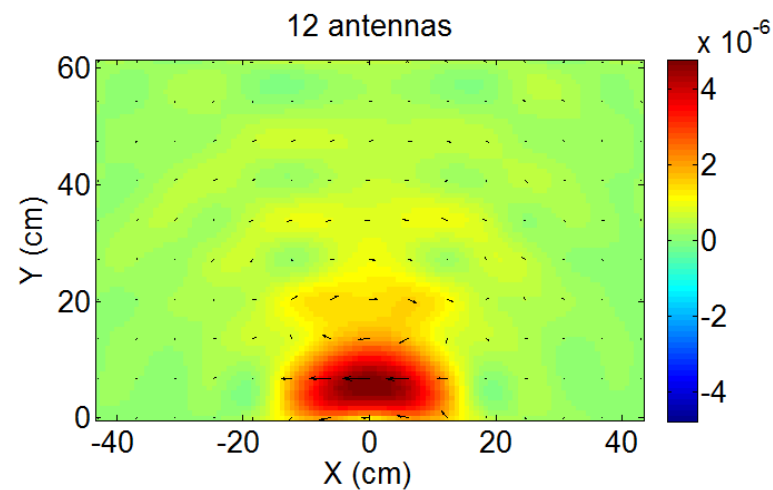
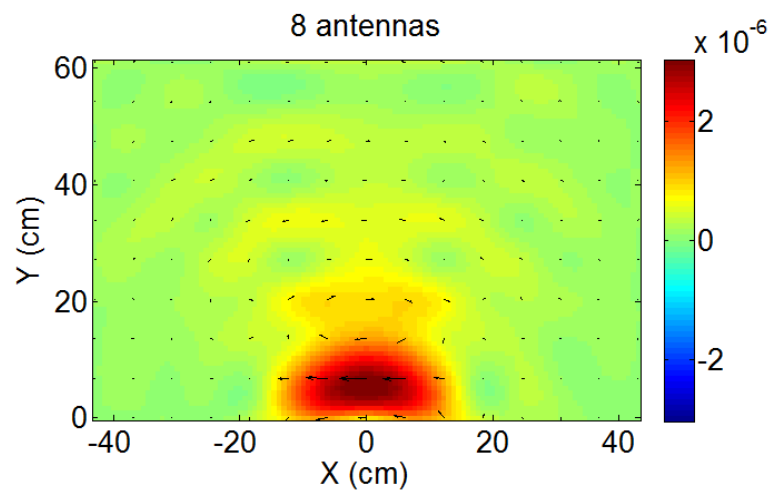
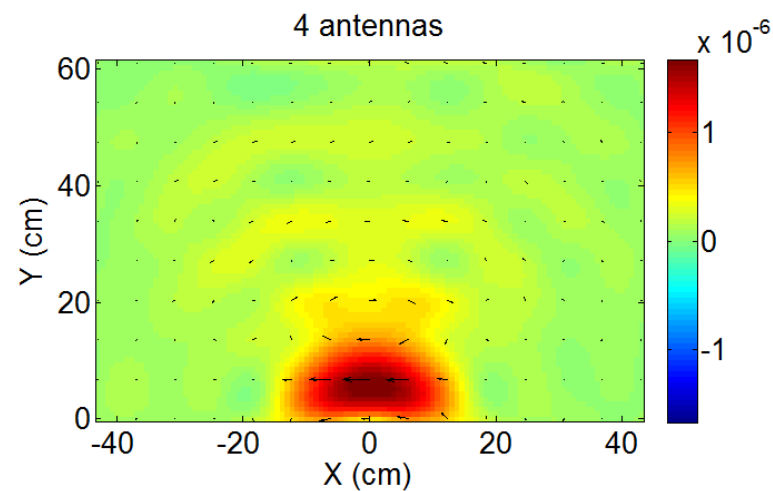
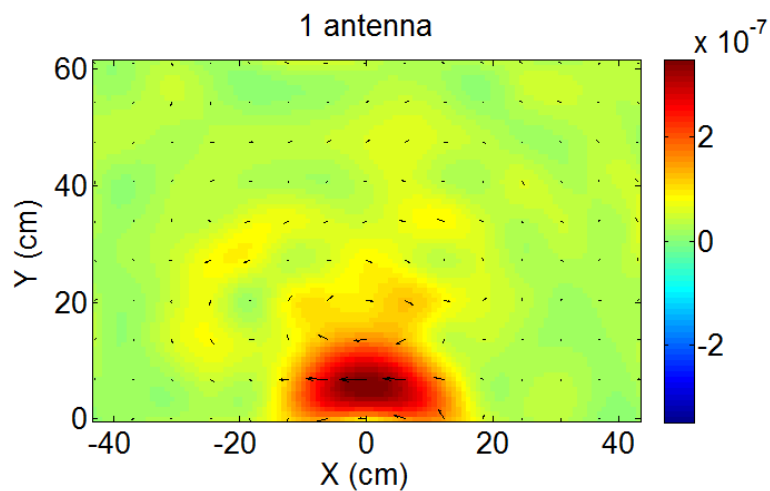
Un exemple de front d'onde généré en TREC : bonne répétabilité spatiale

Vers une imagerie EMC



La capacité de discriminer la polarisation implique celle d'identifier la nature du couplage.

Vers une imagerie EMC



Conclusions et perspectives

- Introduction d'une technique généralisée de RT
- Application aux CR : définition de la TREC
- Avantages de CR et CA, plus souplesse, vitesse et rendement
- Démonstration d'utilisation pour la détection des voies de couplage
- But : en faire un moyen d'essai en soit, plutôt qu'une imitation des CAs
- Normalisation ?

- Autres applications en cours d'étude:
 - Émulation de scénarii de propagation complexes
 - Imagerie microonde (mesure bistatiques rapides)
 - Guerre électronique